# 稻纵卷叶螟的飞行和再迁飞能力

王凤英，张孝羲，翟保平*
（南京农业大学昆虫学系，农业部病虫害监测与治理重点开放实验室，南京 210095）

**摘要**：稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée)可以通过连续几夜的飞行实现远距离迁移，这种变幻莫测的再迁飞能力给稻纵卷叶螟的预测造成了极大的困难，明确其迁飞行为参数是灾变预警的前提。为此，利用飞行磨装置测定了稻纵卷叶螟成虫的飞行能力和再迁飞能力。结果表明：在生殖隔离条件下，稻纵卷叶螟不同日龄和不同性别的成虫的飞行能力间没有显著差异，雌雄虫的平均飞行时间分别为 156.94 ± 103.19 min 和 147.71 ± 111.38 min。根据吊飞的累计飞行时间(accumulative flight duration, AFD)可将稻纵卷叶螟种群划分为居留型(AFD < 40 min)、迁飞型(40 min≤AFD≤130 min)和强迁飞型(AFD > 130 min) 3 种类型；且 3 种类型的个体比率分别为 46.1%，27.3% 和 26.6%，其中居留型平均累计飞行时间为 11 min，迁飞型为 82 min，强迁飞型为 232 min。稻纵卷叶螟具有很强的再迁飞能力，其种群作一次迁飞的个体比率都大于 90%，2 次(夜)再迁飞的比率达 70% 以上，一般可进行 4 ~ 5 次(夜)再迁飞，最多可达 9 次(夜)。成虫的补充营养对再迁飞能力没有显著影响，但蜜水可增强成虫的飞行能力。这些研究结果为稻纵卷叶螟的虫源分析和迁入区预测提供了基本参数。

**关键词**：稻纵卷叶螟；飞行能力；再迁飞能力；吊飞；食料条件
**中图分类号**：Q968 **文献标识码**：A **文章编号**：0454-6296(2010)11-1265-08

# Flight and re-migration capacity of the rice leaffolder moth, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Crambidae)

WANG Feng-Ying, ZHANG Xiao-Xi, ZHAI Bao-Ping* (Key Laboratory of Monitoring and Management of Plant Diseases and Insect Pests, the Ministry of Agriculture, Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract**: The migration process of the rice leaffolder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée), is composed of several successive long-distance nocturnal flights. It is the unpredictable re-migration ability that makes the outbreak forecasting of rice leaffolder extremely difficult. So it is important to understand the parameters of the flight behaviour of rice leaffolder for its prediction. In this study, the flight and re-migration capacity of the rice leaffolder moth were examined by tethered flight on a computerized flight mill. The results indicated that there were no significant differences in flight capacity of moths among different ages and sex, and the mean flight duration of males and females were 156.94 ± 103.19 min and 147.71 ± 111.38 min, respectively. Based on the accumulative flight duration (AFD) of the individuals on flight mill, the moths could be divided into three types: the residence type (AFD < 40 min), the migratory type (40 min ≤AFD≤ 130 min) and the strong migratory type (AFD > 130 min). The proportions of individuals and mean flight duration of the three types were 46.1% and 11 min, 27.3% and 82 min, and 26.6% and 232 min, respectively. Strong re-migration capacity of *C. medinalis* had been observed during the experiment. In all of the tested moths, the proportion of the one-off migration was higher than 90%, the twice re-migration above 70%, about half of the moths could fly for 4 - 5 successive nights, and the maximum re-migration was nine nights. There were no significant effects on re-migration capacity of the moths by foods, but feeding honey could enhance the flight capacity. These results will provide useful behavioral parameters for trajectory analysis and immigration forecasting of the rice leaffolder.

**Key words**: *Cnaphalocrocis medinalis*; flight capacity; re-migration capacity; tethered flight; food conditions

基金项目：国家自然科学基金项目(30871602)；农业公益性行业科研专项(200903051)；水稻产业技术体系项目(nycytx-01)
作者简介：王凤英，女，1982 年生，山东济宁人，硕士，主要从事昆虫生态学研究，E-mail：wfy58260396@163.com
*通讯作者 Corresponding author, E-mail: bpzhai@njau.edu.cn
收稿日期 Received: 2010-04-23；接受日期 Accepted: 2010-10-02

确定迁飞昆虫的飞行行为参数是进行昆虫的迁飞轨迹分析和研究昆虫迁飞途径的首要前提，昆虫的飞行能力包括再迁飞能力，是迁飞性昆虫的标志性生命参数，直接决定了其种群的扩散范围和能否成功定殖，也是明确其迁入分布和虫源区的关键因子。翟保平(1992)及封传红等(2001)对褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål)再迁飞能力的研究表明，温带稻区褐飞虱自然种群中再迁飞个体的比率只有0.84%，基本上不存在再迁飞；汪远昆和翟保平(2004)对白背飞虱 *Sogatella furcifera* (Horváth)的再迁飞能力研究表明其再迁飞比率为5.7%，也是极低的。这表明，这两种飞虱的迁飞过程都是一次性的单程飞行(封传红等，2002)。而稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée)则像其他鳞翅目昆虫那样，要经过昼伏夜行多次迁飞实现远距离转移。它们可以连续飞行若干个夜晚，每个夜晚起飞时当地的风速风向将决定它们第2天黎明时降落的地方，所以其飞行过程和飞行轨迹极其复杂。而我们却不知道稻纵卷叶螟究竟能飞几个夜晚，不知道迁入的蛾子是否还要离去，若离去它们会走多远到哪儿去，不知道每次降落后的食料状况对其此后的飞行有何影响。这种变幻莫测的再迁飞能力正是我们对稻纵卷叶螟的预测至今仍束手无策的根本原因。因此，稻纵卷叶螟的飞行能力和再迁飞能力(次数和概率)是亟待阐明的问题。

迄今为止只有湖南农学院(陈永年，1979)及郑祖强和张孝羲(1989)对稻纵卷叶螟的飞行能力作过初步研究。但由于湖南农学院当时缺少自动记录装置，飞行能力的测定仅凭目测并以秒表记数，其结果有很大的局限性；郑祖强和张孝羲(1989)在其学位论文研究中曾吊飞过稻纵卷叶螟的飞行能力，但只测定了蛾子的一次性飞行能力(吊到力竭而死)，其结果也未发表。为了明确稻纵卷叶螟的飞行能力和再迁飞能力，我们用飞行磨测定了稻纵卷叶螟的飞行能力，同时通过室内模拟试验研究了稻纵卷叶螟的再迁飞能力，以期为稻纵卷叶螟的异地预测提供有效的参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 飞行磨

采用中国农业科学院植物保护研究所研制的测定小型昆虫飞行能力的飞行磨系统。该系统由电脑控制，每次能同时测定32头供试虫，并能对测试数据自动记录、分析处理(程登发等，1997)。

### 1.2 虫源

自7月底从江苏省农业科学院田间逐日采集稻纵卷叶螟4、5龄老熟幼虫，携至室内在26℃恒温条件下用新鲜水稻叶饲养，每日更换水稻叶，化蛹后分雌雄，分别放入铺有湿润脱脂棉的培养皿中，再把装有雌雄蛹的培养皿分别放入小笼子里。待其羽化后，根据试验需要按日龄进行吊飞测定。

### 1.3 飞行能力测定

**1.3.1** 试验设计：各处理的飞行能力测定都是在相同的环境下进行的。吊飞过程中室内温度控制在26℃，相对湿度为60%~80%，吊飞室内保持黑暗。吊飞时先将待测个体用乙醚轻微麻醉，然后将飞行磨吊臂用502胶粘在待测个体的前胸背板上。每次试验均在下午6点左右开始，飞行能力的测定处理是将供试个体放在飞行磨上吊飞24 h，若24 h后仍能飞行，则继续吊飞，至其不再飞行为止，然后按个体及每小时计算其飞行时间、速度和距离。

对不同食料飞行能力的测验中，第1天取食清水的成虫，吊飞取下后仍旧取食清水；第1天取食10%蜂蜜水的，吊飞取下后仍旧取食蜂蜜水，其余处理试虫都取食清水。所有吊飞测试处理的蛾在其死亡后均立即做雌蛾卵巢解剖，记录其当时卵巢发育级别。

**1.3.2** 种群迁飞类型的分化测定：将供试个体的累计飞行时间(T)取常用对数，并对这些对数值做频次分布，然后以Table Curve2D5.0进行曲线拟合，并分别解出其峰值和谷值的极点值，其中3个主峰的分界点(谷值的极点值)就是居留型、迁飞型和强迁飞型的分界值。

**1.3.3** 迁飞型种群飞行能力的测定和比较：试验先按个体进行吊飞，在去除了居留型个体后对所有迁飞型个体的记录进行种群飞行能力(平均飞行时间、速度和距离)的计算和比较，比较项目包括：各日龄的飞行能力测定包括羽化后第1，2，3，4日龄飞行能力的比较；1日龄雌雄成虫间飞行能力的比较，以及饲料对飞行能力的影响。

**1.3.4** 再迁飞能力的测定：各处理的再迁飞能力测定都是在同样的环境下进行的。吊飞过程中室内温度控制在26℃，相对湿度为60%~80%，吊飞室内保持黑暗。每次试验均在下午6点左右开始，用以上同样方法在飞行磨上吊飞4 h后，然后小心取下，以清水饲养，第2天再进行吊飞试验。如此重复直至死亡，按个体记录其各飞行数据和再迁飞的

次数。所有吊飞测试处理的蛾在其死亡后均立即做雌蛾卵巢解剖，记录其当时卵巢发育级别。

对不同食料再迁飞能力的测验中，第 1 天取食清水的成虫，吊飞取下后仍旧取食清水；第 1 天取食 10% 蜂蜜水的，吊飞取下后仍旧取食蜂蜜水，其余处理试虫都取食清水。

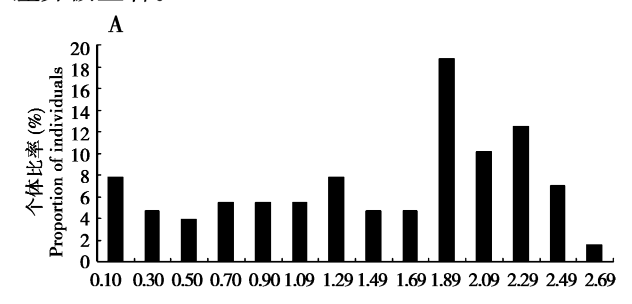
### 1.4　数据统计与分析

飞行频次的曲线拟合用 Table Curve2D5.0 进行样条插值的方式进行，同时可以求出各极值点的坐标。飞行能力（平均飞行时间、飞行距离和飞行速度）的方差分析等均用 SAS 6.12 处理分析。飞行时间经过自然对数转换后再做方差分析。

## 2　结果与分析

### 2.1　稻纵卷叶螟飞行能力的多型现象——飞行类型的分化

将吊飞试验中所有 1 日龄稻纵卷叶螟（128 头）的飞行累计时间（T）的常用对数作频次分布图（图 1），可见 3 个主峰（分别是 1.29，1.89，2.29），以此分别代表居留型、迁飞型和强迁飞型的峰值，峰值分别为飞行 19.5 min（对数值为 1.29），77.6 min（对数值为 1.89）和 195.0 min（对数值为 2.29）。其间的波谷即为各类型间的分界点（图 1）。居留型和迁飞型的分界点为 39.8 min（对数值为 1.60）。迁飞型和强迁飞型的分界点为 131.8 min（对数值为 2.12）。据此，可将居留型与迁飞型的分界点定为累计飞行 40 min，迁飞型与强迁飞型的分界点定为 130 min。其中，居留型、迁飞型和强迁飞型的个体比率分布分别为 46.09%，27.34% 和 26.56%（表 1）。可以认为居留型在供试个体中约占 40% 左右，迁飞型和强迁飞型的个体约各占近 30%，且居留型平均飞行时间为 10 min，迁飞型为 82 min，强迁飞型为 232 min，3 种类型的飞行时间差异极显著。



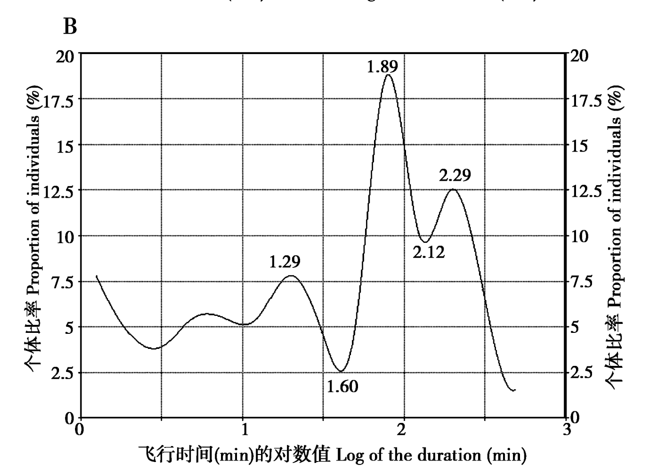




图 1　稻纵卷叶螟飞行频次分布图（A）及其拟合曲线（B）

Fig. 1　Frequency distribution of flight duration of *Cnaphalocrocis medinalis* (A) and its fitted curve (B)

**表 1　稻纵卷叶螟种群迁飞型的飞行能力范围及个体比率**

**Table 1　Duration of tethered flight of different migration types of *Cnaphalocrocis medinalis* and their proportions of individuals**

| 迁飞类型 Migration type | 划分阈值（min）Partition threshold | 累计飞行时间（min）Accumulative flight duration | 飞行时间对数 Logarithm of flight duration | 平均飞行时间（min）Mean flight duration | 累计个体比率（%）Accumulated proportion of individuals |
|---|---|---|---|---|---|
| 居留型 Residence type | | 1.00 – 39.99 | 0.000 – 1.602 | 10.85 A | 46.09 |
| | lg 1.6 (40 min) | | | | |
| 迁飞型 Migratory type | | 41.69 – 129.72 | 1.620 – 2.113 | 81.92 B | 27.34 |
| | lg 2.12 (130 min) | | | | |
| 强迁飞型 Strong migratory type | | 130.32 – 592.93 | 2.115 – 2.773 | 232.31 C | 26.56 |

同列数据后不同大写字母表示差异极显著（$P<0.01$）。Different uppercase letters following the data within a column mean extremely significant differences ($P<0.01$).

### 2.2 稻纵卷叶螟的不同性别飞行能力的比较

同一条件下饲养的稻纵卷叶螟中，雌雄蛾的飞行能力没有显著差异(表2)。

### 2.3 稻纵卷叶螟不同日龄的飞行能力测定

吊飞试验发现，不同日龄的个体飞行能力无论其平均飞行时间、速度和距离都没有显著差异(表3)。

### 2.4 稻纵卷叶螟不同飞行时段内的飞行能力比较

稻纵卷叶螟成虫仅在夜间飞行，一般在朦影时刻起飞至晨昏时刻，可能有 8 ~ 10 h，但种群内各飞行个体在一夜内的实际主动飞行时间和分布概率，也即在夜间各时段间的降落节律，至今尚无任何试验或观察的数据记录。表 4 显示，在开始吊飞飞行后的 8 h 中，稻纵卷叶螟飞行个体在各个小时内的分布比率和平均飞行时间。可见在前 4 h 内有 80% 以上的成虫飞行，而在 5 h 内只有 70% 左右成虫飞行，6 h 以后比率显著下降，8 h 的飞行比率已经降到了 20% 以下。成虫个体在吊飞飞行的前 8 h 内，以前 4 h 内飞行的时间显著较长，分别为 31.46 min，38.22 min，32.61 min 和 26.52 min，第 5 和 6 小时飞行时间有所降低，而至第 7 和 8 小时间则明显降低，说明起飞成虫种群的主动飞行主要集中在前 4 ~ 5 h 内，以后的飞行无论飞行个体比例和能力均有所降低。

**表 2 不同性别稻纵卷叶螟蛾的飞行能力**

**Table 2 Flight capacity of male and female of *Cnaphalocrocis medinalis***

| 性别 Sex | 供试蛾数 Number of moths tested | 平均飞行时间(min) Mean flight duration | 平均飞行速度(km/h) Mean flight speed | 飞行距离(km) Mean flight distance |
|---|---|---|---|---|
| 雄虫 Male | 34 | 147.71 ± 111.38 a | 1.85 ± 0.51 a | 5.06 ± 4.76 a |
| 雌虫 Female | 37 | 156.94 ± 103.19 a | 1.80 ± 0.41 a | 4.95 ± 3.81 a |

同列数据(平均值 ± 标准差)后的字母表示经 Duncan 氏多重比较后，在 0.05 水平上差异显著性，处理间字母不同的表示差异显著，字母相同的表示无显著差异，下同。Different letters following the data (mean ± *SD*) with in a column mean significant differences between treatments at 0.05 levels by Duncan's multiple range test, while the same letters mean no significant difference. The same below.

**表 3 不同日龄稻纵卷叶螟蛾的飞行能力**

**Table 3 The flight capacity of *Cnaphalocrocis medinalis* at different ages**

| 日龄(d) Age | 供试蛾数(头) Number of moths tested | 平均飞行时间(min) Mean flight duration | 平均飞行速度(km/h) Mean flight speed | 平均飞行距离(km) Mean flight distance |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 71 | 152.52 ± 106.52 a | 1.82 ± 0.46 a | 5.00 ± 4.26 a |
| 2 | 10 | 124.97 ± 88.81 a | 1.45 ± 0.36 b | 3.05 ± 2.17 a |
| 3 | 12 | 127.50 ± 41.91 a | 2.01 ± 0.43 a | 4.47 ± 2.23 a |
| 4 | 13 | 105.67 ± 55.58 a | 1.91 ± 0.41 a | 3.44 ± 2.18 a |

**表 4 不同飞行时段内稻纵卷叶螟飞行个体的比率及飞行能力**

**Table 4 The proportion and flight capacity of *Cnaphalocrocis medinalis* in different flight period**

| 飞行时段(h) Flight period | 吊飞个体总数 Number of moths tested | 飞行个体数 Number of flying moths | 飞行个体比率(%) Proportion of flying moths | 平均飞行时间(min) Mean flight duration |
|---|---|---|---|---|
| 第 1 小时 1st hour | 69 | 68 | 98.55 | 31.46 ± 16.12 ab |
| 第 2 小时 2nd hour | 69 | 66 | 95.65 | 38.22 ± 17.55 a |
| 第 3 小时 3rd hour | 69 | 61 | 88.41 | 32.61 ± 18.70 ab |
| 第 4 小时 4th hour | 69 | 57 | 82.61 | 26.52 ± 18.22 bc |
| 第 5 小时 5th hour | 69 | 48 | 69.57 | 21.50 ± 19.31 cd |
| 第 6 小时 6th hour | 69 | 29 | 42.03 | 21.90 ± 16.34 cd |
| 第 7 小时 7th hour | 69 | 23 | 33.33 | 15.23 ± 18.82 d |
| 第 8 小时 8th hour | 69 | 12 | 17.39 | 15.79 ± 17.34 d |

## 2.5　不同性别、不同日龄稻纵卷叶螟蛾再迁飞能力比较

用清水饲养的稻纵卷叶螟中，雌雄蛾的再迁飞能力和比率基本上没有显著差异（表 5），但可以看出不论 1 日龄还是 3 日龄，雌虫相对高于雄虫，从日龄比较则 3 日龄起飞的其以后各次再迁飞的比率也相对要比 1 日龄为高。如在雌成虫中，1 日龄第 1 和 2 次的再迁飞比率较高，第 3 次则降到 30% 左右，而 3 日龄第 3 次再迁飞比率仍保持在 50% 以上，第 4 次再迁飞比率则迅速降低到 10% 左右；在雄成虫中，1 日龄在第 2 次的再迁飞比率降到 35%，而 3 日龄在第 2 次的再迁飞比率仍很高，达到 60%。

## 2.6　食料对稻纵卷叶螟再迁飞能力的影响

分别吊飞饲喂蜂蜜水和清水两种处理的成虫并做卵巢解剖，结果表明：不同食料对飞行能力有显著影响，而对再迁飞次数的影响不明显。1 日龄起飞的成虫，第 1 次起飞和第 1 次再迁飞时取食蜂蜜水和清水成虫的飞行能力没有显著差异，但是在第 3 和 4 次起飞时，取食蜂蜜水的成虫飞行能力显著高于取食清水的成虫。3 日龄起飞的成虫则更明显，3 日龄成虫第 1 次起飞时的飞行能力没有显著差异，但在以后的再起飞过程中，取食蜂蜜水的累计飞行时间仍旧维持在 100 min 以上，而取食清水的成虫累计飞行时间已经降到了 100 min 以下，在第 3 次再起飞时，取食清水的成虫累计飞行时间降到了 15 min，而取食蜂蜜水的成虫累计飞行时间仍旧维持在 100 min 以上（表 6）。以上结果说明取食 10% 的蜂蜜水能大大增强稻纵卷叶螟的飞行能力，但食料对再迁飞次数和不同日龄的飞行能力均没有显著影响，这也说明决定稻纵卷叶螟的再迁飞特性的内因比外因更重要。

**表 5　不同性别、不同日龄的稻纵卷叶螟再迁飞能力比较**

**Table 5　The re-migration capacity of *Cnaphalocrocis medinalis* of different sex at different age**

| 日龄(d) Age | 飞行次数 Flight times | 供试蛾数 Number of moths tested | | 平均飞行时间(min) Mean flight duration | | 再迁飞比率(%) Proportion of re-migration | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 雌 Female | 雄 Male | 雌 Female | 雄 Male | 雌 Female | 雄 Male |
| 1 | 第 1 次起飞 1st flight | 51(34) | 39(28) | 103.31 ± 82.41 abA | 57.04 ± 69.14 bB | 66.67 bcA | 71.79 bA |
| | 第 1 次再迁飞 1st re-migration | 34(27) | 28(14) | 105.70 ± 72.97 abA | 102.31 ± 82.11 abA | 52.94 bA | 35.90 cA |
| | 第 2 次再迁飞 2nd re-migration | 27(15) | 14(10) | 88.60 ± 60.59 abA | 70.70 ± 76.41 abA | 29.41 dA | 25.64 cdA |
| | 第 3 次再迁飞 3rd re-migration | 15(12) | 10(6) | 53.75 ± 47.61 bcdA | 87.53 ± 68.53 abA | 23.53 deA | 15.38 dA |
| 3 | 第 1 次起飞 1st flight | 36(34) | 42(35) | 129.80 ± 74.95 aA | 120.57 ± 71.58 abA | 94.44 aA | 83.33 aA |
| | 第 1 次再迁飞 1st re-migration | 34(27) | 35(25) | 72.82 ± 59.35 bcA | 103.52 ± 88.91 abA | 75.00 cA | 59.52 bA |
| | 第 2 次再迁飞 2nd re-migration | 27(19) | 25(12) | 31.00 ± 21.59 cdA | 133.15 ± 82.20 aB | 52.78 bcA | 28.57 cdB |
| | 第 3 次再迁飞 3rd re-migration | 19(4) | 12(7) | 15.29 ± 6.75 dA | 76.45 ± 101.76 abA | 11.11 eA | 16.67 cdA |

数据（平均值 ± 标准差）后的字母表示经 Duncan 氏多重比较后（起飞比率用 *U* 测验），在 0.05 水平上差异显著性，大写字母表示横向比较，小写字母表示纵向比较，处理间字母不同的表示差异显著，字母相同的表示无显著差异；表 6 同。括括号内所示为各日龄各次的起飞虫数。再迁飞比率 = 各次起飞虫数/第 1 次处理虫数。Different letters following the data (mean ± *SD*) mean significant differences between treatments at the 0.05 level by Duncan's multiple range test (the significance of re-migration proportion of the moths was examined by the *U* test), while the same letters mean no significant difference. The capitals mean horizontal comparison, and the lowercases mean portrait comparison. The same for Table 6. The numbers in parentheses show the number of the flight moths in different ages and migration times. Proportion of re-migration = number of flight moths in different migration times/number of tethered moths in the first time.

**表 6 营养条件对稻纵卷叶螟再迁飞能力的影响**

**Table 6 The influence of foods on the flight capacity of *Cnaphalocrocis medinalis***

| 日龄(d) Age | 飞行次数 Migration times | 平均飞行时间 Flight duration | | 再迁飞比率(%) Proportion of re-migration | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 取食清水 Water fed | 取食蜜水 Honey fed | 取食清水 Water fed | 取食蜜水 Honey fed |
| 1 | 第 1 次起飞 1st flight | 103.31 ±82.41 abA | 82.82 ±72.94 cA | 66.67 bcA | 84.64 aA |
| | 第 1 次再迁飞 1st re-migration | 105.70 ±72.97 abA | 137.97 ±79.71 abcA | 52.94 bA | 57.69 bA |
| | 第 2 次再迁飞 2nd re-migration | 88.60 ±60.59 abA | 181.11 ±70.50 aB | 29.41 dA | 30.77 bcA |
| | 第 3 次再迁飞 3rd re-migration | 53.75 ±47.61 bcdA | 126.60 ±72.77 abcB | 23.53 deA | 19.23 cA |
| 3 | 第 1 次起飞 1st flight | 129.80 ±74.95 aA | 135.91 ±72.56 abcA | 94.44 aA | 93.62 aA |
| | 第 1 次再迁飞 1st re-migration | 72.82 ±59.35 bcA | 175.51 ±60.54 abB | 75.00 cA | 53.19 bB |
| | 第 2 次再迁飞 2nd re-migration | 31.04 ±21.59 cdA | 137.60 ±83.05 abcB | 52.78 bcA | 44.68 bcA |
| | 第 3 次再迁飞 3rd re-migration | 15.29 ±6.75 dA | 109.99 ±80.08 bcB | 11.11 eA | 27.66 cA |

总的来看，无论是不同日龄还是不同性别的的成虫，其飞行能力或再迁飞比率都随再迁飞次数的增加而显著降低(表 3, 5)，尤其是在开始迁飞后的第 4 天(第 3 次再迁飞)其再迁飞比率可普遍降至 20% 左右，而且食物对再迁飞比率没有显著影响(表 6)。

### 2.7 稻纵卷叶螟种群的再迁飞比例

吊飞结果表明，稻纵卷叶螟可进行 4 ~ 5 次再迁飞，最多可达 9 次再迁飞(表 7)，而其再迁飞的个体比率随着再迁飞次数的增多而逐渐降低；不同起飞日龄的再迁飞比率存在一定的差异，不论是取食清水还是蜜水，1 日龄的再迁飞比率总是低于其他日龄。且取食清水的种群和取食蜜水的种群都随着再迁飞次数的增加而其再迁飞个体的比率逐渐降低。稻纵卷叶螟的再迁飞能力很强或比率很高，其再迁飞个体在第 1 次迁飞时一般都在 80% ~ 90% 以上，即使到第 3 次迁飞时仍占整个迁飞虫数比率的 50% 左右，即迁飞型中有一半以上的个体仍能进行再迁飞。

**表 7 稻纵卷叶螟的再迁飞比率**

**Table 7 Proportion of re-migration of *Cnaphalocrocis medinalis***

| 处理 Treatment | 日龄(d) Age | 供试蛾数 Number of moths tested | 不同飞行次数再迁飞比率 Proportion of re-migration in different take-off times (%) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 第 1 次 1st time | 第 2 次 2nd time | 第 3 次 3rd time | 第 4 次 4th time | 第 5 次 5th time | 第 6 次 6th time | 第 7 次 7th time | 第 8 次 8th time | 第 9 次 9th time |
| 取食清水 Water fed | 1 | 51 | 66.67(34) | 52.94(27) | 29.41(15) | 23.53(12) | 7.84(4) | 1.96(1) | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 36 | 94.44(34) | 75.00(27) | 52.78(19) | 11.11(4) | 2.78(1) | 2.78(1) | 0 | 0 | 0 |
| 取食蜜水 Honey fed | 1 | 25 | 84.00(21) | 60.00(15) | 32.00(8) | 20.00(5) | 16.00(4) | 12.00(3) | 12.00(3) | 0 | 0 |
| | 2 | 29 | 89.66(26) | 86.21(25) | 55.17(16) | 31.03(9) | 17.24(5) | 6.90(2) | 6.90(2) | 3.45(1) | 3.45(1) |
| | 3 | 47 | 93.62(44) | 53.19(25) | 44.68(21) | 27.66(13) | 10.64(5) | 6.38(3) | 2.13(1) | 0 | 0 |
| | 4 | 23 | 100.00(23) | 82.61(19) | 60.87(14) | 56.52(13) | 21.74(5) | 4.35(1) | 0 | 0 | 0 |

括号内数值所示为各日龄再迁飞虫数，括号前数值为各次再迁飞比率。Figures in parentheses show the number of re-migration moths at different ages, and figures before brackets show the proportions of re-migration in different re-migration times.

## 3 讨论

应用吊飞装置来研究昆虫的迁飞行为或特性虽不能完全模拟或表达昆虫的自然状况，但迄今为止在昆虫的生理、生态研究中仍是被普遍认可和应用的一种实验工具(Rankin and Rankin, 1979; Dingle, 1979)。在我国也曾用多种吊飞装置先后研究过东

亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis*（Meyen）（刘辉等，2007）、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* Hübner（郑祖强等，2000）、粘虫 *Mythimma separata*（Walker）（蔡彬等，2002）、水稻三化螟 *Tryporyza inceriulas* Walker、二化螟 *Chilo suppressalis* Walker、大螟 *Sesamia inference* Walker（孙建中等，1993）、水稻褐飞虱（封传红等，2001）、白背飞虱（汪远昆和翟保平，2004）、稻纵卷叶螟（郑祖强和张孝羲，1989）和棉蚜 *Aphis gossypii*（刘向东等，2003）等的飞行行为。郑祖强和张孝羲（1989）通过吊飞试验研究了稻纵卷叶螟的飞行能力，将吊飞的持续飞行时间为 20 min 作为划分稻纵卷叶螟迁飞型和居留型的标准，120 min 作为划分迁飞型和强迁飞型的分界点，显然标准偏低。本试验通过吊飞飞行拟合曲线的精细计算表明，20 min 恰是居留型频次分布的峰值，而稻纵卷叶螟居留型和迁飞型的分界点应划为 40 min，迁飞型和强迁飞型的分界点为 130 min。居留型的飞行能力显著弱于迁飞型，其飞行活动是为了满足近距离扩散（寻找食物和交配）的需求。但从总体上来看，本文与郑祖强和张孝羲(1989)的研究结果基本是一致的，两者均呈现种群的飞行能力分化有 3 种迁飞型，只是 3 种类型的具体划分标准略有差异。此外，由于吊飞所用的具体装置有所不同，也可能会导致 3 种类型的具体划分标准略有偏差，还需进一步改进测定技术及方法。

国内外过去对昆虫迁飞能力的测定大多偏重于昆虫本身飞行能力模拟吊飞的种间比较，或昆虫各种内在生理状态或各种外界因素影响下飞行能力的分析比较，而对迁飞过程中的再迁飞行为和能力的研究比较少。

昆虫的迁飞过程被概括为“起飞、运转、降落”3 个过程（张孝羲，1980；陈若篪等，1989），每个过程都受到昆虫本身内在的生物学特性以及外界环境因子的影响，如虫口密度、食物质量、光周期、温湿度和气流等因子对昆虫的迁飞影响较大。张孝羲（1980）将昆虫的迁飞归纳成 3 种类型，类型Ⅰ：种群个体羽化后稍取食，在幼嫩阶段后期迁飞到另一地点越冬、越夏，待越冬、越夏结束后再迁回到原地定居、取食危害、繁殖，如棉蚜和稻水象 *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel 等；类型Ⅱ：幼嫩阶段后期一次性、中间不停留地迁飞到另一地区定居、危害、繁殖，如褐飞虱和白背飞虱等；类型Ⅲ：从出生地在幼嫩阶段后期迁飞到中间地停息或取食，再次起飞到另一中间地，这样可连续多次，直至体内激素改变，在繁殖地定居、危害、交配繁殖，如多种飞蝗和鳞翅目昆虫等。稻纵卷叶螟就属于类型Ⅲ。本文通过试验充分证明该种昆虫具有很强的再迁飞能力，在所有吊飞个体中，试虫的第 1 次起飞比率多在 90% 左右，能进行 2 次迁飞的比率达 70% 以上，一般可再迁飞 4 ~ 5 次，最多可达 9 次。再迁飞能力越强则在气流条件适宜情况下其迁飞的距离也越远。这与过去对稻纵卷叶螟的大量标记回捕试验的结果是一致的，回捕地与标放地的直线距离最长可达 800 ~ 1 100 m（张孝羲，1980），但在气流条件在短期内多变的情况下，有多次再迁飞的种类的飞行轨迹可能会发生各种迂回曲折的变化，甚至倒流现象，给轨迹的判断或预测带来困难，不像一次性迁飞种类如稻飞虱那样简单明了（王凤英等，2009）。

当然，作为飞行磨吊飞的试验结果，飞行能力只能作为测试供试虫的一种飞行潜能和生理指标（翟保平和张孝羲，1993），这种潜能在自然条件下有多大频度、在什么时候得以表达还不得而知。本研究经过吊飞测得稻纵卷叶螟的飞行能力和再迁飞能力，虽然在一定程度上阐释了稻纵卷叶螟自然种群在田间的大批量多次再迁飞现象，但毕竟仍是非自然情况下的模拟结果，尚需要更多的实证研究。今后需开展多学科交叉、宏微观结合、观测与模拟同步、生理生态学试验与数值试验并重的多尺度和多途径综合研究，揭示稻纵卷叶螟再迁飞行为的大气动力学机制和生理生态机制，阐明本地种群与过境种群迁飞与滞留的影响因子，为稻纵卷叶螟的虫源分析、迁入区预测和灾变预警提供基本参数。

## 参 考 文 献（References）

Cai B，Jiang XF，Luo LZ，Cao YZ，Liu YQ，2002. Influences of temperature and humidity on utilization of energy substance during flight in the moths of oriental armyworm *Mythimna separata* (Walker). *Acta Ecologica Sinica*，22(7)：1068 – 1074.［蔡彬，江幸福，罗礼智，曹雅忠，刘悦秋，2002. 温、湿度对粘虫蛾飞行能源物质利用的影响. 生态学报，22(7)：1068 – 1074］

Chen RC，Ding JH，Tan HQ，Hu GW，1989. Migratory Entomology. China Agriculture Press，Beijing. 289 – 300.［陈若篪，丁锦华，谈涵秋，胡国文，1989. 迁飞昆虫学. 北京：中国农业出版社. 289 – 300］

Chen YN，1979. The observation of flight characteristics of *Cnaphalocrocis medinalis* I. The flight duration and wing beat frequency. *Journal of Hunan Agricultural College*，(3)：42 – 47.［陈永年，1979. 稻纵卷叶螟飞翔特性初步观察：Ⅰ. 飞翔持续时间和振翅频率. 湖南农学院学报，(3)：42 – 47］

Cheng DF, Tian Z, Sun JR, Ni HX, Li GB, 1997. A computer-monitored flight mill system for tiny insects such as aphids. *Acta Entomologica Sinica*, 40(Suppl.): 172 – 179. [程登发, 田喆, 孙京瑞, 倪汉祥, 李光博, 1997. 适用于蚜虫等微小昆虫的飞行磨系统. 昆虫学报, 40(增刊): 172 – 179]

Dingle H, 1979. Adaptive variation in the evolution of insect migration. In: Rabb RL, Kennedy GG eds. Movement of Highly Mobile Insects: Concepts and Methodology in Research. North Carolina State University Press, Raleigh, North Carolina. 64 – 87.

Feng CH, Zhai BP, Zhang XX, 2001. Re-migration capacity of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *Chinese Journal of Rice Science*, 15(2): 125 – 130. [封传红, 翟保平, 张孝羲, 2001. 褐飞虱的再迁飞能力. 中国水稻科学, 15(2): 125 – 130]

Feng CH, Zhai BP, Zhang XX, Tang JY, 2002. Immigration of the 1991 outbreak populations of rice planthopper (*Nilaparvata lugens* and *Sogatella fercifera*) into northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 22(8): 1302 – 1314. [封传红, 翟保平, 张孝羲, 汤金仪, 2002. 我国北方稻区 1991 年稻飞虱大发生虫源形成. 生态学报, 22(8): 1302 – 1314]

Liu H, Li KB, Yin J, Du GL, Zhao X, Cao YZ, 2007. Comparative studies on the flight ability of the social type and scattered type of *Locusta migratoria manilensis*. *Plant Protection*, 33(2): 34 – 37. [刘辉, 李克斌, 尹姣, 杜桂林, 赵萱, 曹雅忠, 2007. 群居型与散居型东亚飞蝗飞行能力的比较研究. 植物保护, 33(2): 34 – 37]

Liu XD, Zhang XX, Zhai BP, 2003. Flight activity rhythm of the cotton aphid, *Aphis gossypii* Glover in Nanjing and its flight capacity. *Acta Entomologica Sinica*, 46(4): 489 – 493. [刘向东, 张孝羲, 翟保平, 2003. 南京地区棉蚜的飞行活动节律及其飞行能力. 昆虫学报, 46(4): 489 – 493]

Rankin MA, Rankin SM, 1979. Physiological aspects of insect migratory behavior. In: Rabb RL, Kennedy GG eds. Movement of Highly Mobile Insects: Concepts and Methodology in Research. North Carolina State University Press, Raleigh, North Carolina. 35 – 63.

Sun JZ, Zhang JX, Shen XS, 1993. Flight capacity of *Tryporyza inceriulas* Walker, *Chilo suppressalis* Walker and *Sesamia inference* Walker. *Acta Entomologica Sinica*, 36(3): 315 – 322. [孙建中, 张建新, 沈雪生, 1993. 三化螟、二化螟及大螟成虫的飞翔能力. 昆虫学报, 36(3): 315 – 322]

Wang FY, Hu G, Chen X, Shen HM, Luo SY, Xin DY, Xu SG, Zhang XX, Zhai BP, 2009. Analysis on the causes of recent outbreaks of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) in Nanning, China. *Chinese Journal of Rice Science*, 23(5): 537 – 545. [王凤英, 胡高, 陈晓, 沈慧梅, 罗善煜, 辛德育, 徐盛刚, 张孝羲, 翟保平, 2009. 近年来广西南宁稻纵卷叶螟大发生原因分析. 中国水稻科学, 23(5): 537 – 545]

Wang YK, Zhai BP, 2004. Re-migration capacity of the white-backed planthopper, *Sogatella furcifera* (Horvath). *Acta Entomologica Sinica*, 47(4): 467 – 473. [汪远昆, 翟保平, 2004. 白背飞虱的再迁飞能力. 昆虫学报, 47(4): 467 – 473]

Zhai BP, 1992. The re-migration of brown planthoppers. *Pest Forecasting*, 12(3): 36 – 41. [翟保平, 1992. 也谈褐飞虱的再迁飞问题. 病虫测报, 12(3): 36 – 41]

Zhai BP, Zhang XX, 1993. Behaviour of migrating insects: adaptation and selection to atmospheric environment. *Acta Ecologica Sinica*, 13(4): 356 – 363. [翟保平, 张孝羲, 1993. 迁飞过程中昆虫的行为: 对风温场的适应与选择. 生态学报, 13(4): 356 – 363]

Zhang XX, 1980. The pattern of insect migration and its physiology and ecology mechanism. *Entomological Knowledge*, 17(5): 236 – 240. [张孝羲, 1980. 昆虫迁飞的类型及生理、生态机制. 昆虫知识, 17(5): 236 – 240]

Zheng ZQ, Zhang XX, 1989. Study on the flight capacity of *Cnaphalocrocis medinalis*. In: Proceedings of Researches on Insect Migration in China. Nanjing Agricultural University, Nanjing. 22 – 23. [郑祖强, 张孝羲, 1989. 稻纵卷叶螟飞行能力的研究. 见: 中国迁飞性昆虫研究进展学术讨论会摘要汇编. 南京: 南京农业大学. 22 – 23]

Zheng ZQ, Zhang XX, Xie JY, Mi XY, 2000. Flight capacity and facultative migration of cotton bollworm. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11(4): 603 – 604. [郑祖强, 张孝羲, 谢俊英, 密秀云, 2000. 棉铃虫飞行能力和兼性迁飞的初步研究. 应用生态学报, 11 (4): 603 – 604]

(责任编辑: 袁德成)